

NUMERIČKI PRORAČUN STRUJANJA U CENTRIFUGALNOJ PUMPI

Uroić, T., Horvat, M. & Jasak, H.

Sažetak: Centrifugalne ili radijalne pumpe su podskupina dinamičkih turbopumpi. Služe za podizanje energetske razine fluida u cilju postizanja određenog protoka ili visine dobave. Visina dobave pumpe troši se na savladavanje geodetske visine između razina u spremnicima i visine gubitaka u cjevovodima. Radna točka pumpe je ravnotežno stanje energije koju pumpa predaje radnom fluidu i energije koju troši sustav na savladavanje geodetske visine i hidrodinamičkih otpora. Praktično, radna točka nalazi se u sjecištu karakteristike sustava (cjevovoda) na kojeg je pumpa priključena i karakteristike pumpe prikazanima u dijagramu visina dobave-protok (Q - H dijagramu). U ovome radu prikazana je simulacija strujanja fluida u centrifugalnoj pumpi s dvostrujnim zatvorenim kolom. Za simulacije su korišteni spregnuti i odvojeni rješavač za nestlačiva strujanja iz paketa otvorenog koda OpenFOAM. Uspoređena je konvergencija rješavača za polja brzine i tlaka te za visinu dobave pumpe. Radne točke dobivene simulacijom prikazane su u Q - H dijagramu te je konstruirana radna karakteristika pumpe.

Ključne riječi: centrifugalna pumpa, računalna dinamika fluida, spregnuti rješavač, OpenFOAM.

1 UVOD

Pumpe su strojevi u kojima se mehanički rad doveden preko vratila i rotora, putem inercijskih sila prenosi na fluid kojemu se na taj način podiže energetska razina. Prema smjeru strujanja fluida pumpe se dijele na radijalne, poluaksijalne i aksijalne, a prema principu rada mogu biti dinamičke i volumetričke. Centrifugalna pumpa pripada skupini dinamičkih pumpi, što znači da razlika tlakova (energija) koju postiže pumpa ovisi o kvadratu kutne brzine rotora. Na rotoru se fluid ubrzava u tangencijalnom smjeru te dolazi do prirasta statičkog tlaka, koji se dodatno uvećava usporavanjem fluida u tlačnom kanalu i difuzoru.

Radna točka pumpe određena je protokom fluida Q , visinom dobave pumpe H , snagom pumpe P , iskoristivošću pumpe η te brzinom vrtnje n . Sve radne točke neke pumpe čine karakteristiku pumpe koja se uobičajeno prikazuje u Q - H dijagramu. Centrifugalne pumpe imaju širok spektar primjene jer se vrijednosti protoka kreću od 0,001 do 60 m³/s, visine dobave od 1 do 5000 m i brzine vrtnje od 100 do 30 000 o/min [1]: npr. pumpe snage nekoliko W u sustavima centralnog grijanja ili za hlađenje motora automobila do pumpi snage desetak MW za hlađenje reaktora u nuklearnim elektranama.

U praksi se za određivanje radne točke sve više koristi računalna dinamika fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics*, CFD) kao zamjena skupim eksperimentalnim istraživanjima. Postavlja se zahtjev za kvazi-stacionarnim prikazom fundamentalno tranzijentnog strujanja što unosi nesigurnost u proračun, stoga se posebna pozornost posvećuje modelu interakcije rotora i statora.

2 METODOLOGIJA

Primjenom računalnog paketa otvorenog koda OpenFOAM [3], metodom kontrolnih volumena, rješavaju se Navier-Stokesove jednačbe za nestlačivo strujanje uz primjenu $k-\omega$ SST modela turbulencije sa zidnim funkcijama [4]. Za modeliranje interakcije između rotora i statora koriste se dva pristupa: pristup statičnog (zamrznutog) rotora i tranzijentni pristup s pomičnom mrežom.

2.1 Modeliranje interakcije između rotora i statora

Stacionarni pristup sa zamrznutim rotorom (eng. *frozen rotor*) [2] podrazumijeva da nema pomicanja geometrije ni proračunske mreže što osigurava robusnost i relativnu jednostavnost takvog modela te mogućnost primjene na geometrije s velikim brojem lopatica. No, budući da nije uzet u obzir efekt sila inercije, ovakav je model fizikalno nekonzistentan te dovodi do stvaranja umjetnih vrtloga. Ako se domena proračuna podijeli na više zona te se uvedu lokalni koordinatni sustavi sustavi (eng. *multiple reference frames*, MRF), tranzijentno strujanje se modelira poput stacionarnog, uvođenjem dodatnih inercijskih članova u ćelijama odabrane zone. MRF je razumno primijeniti u slučajevima jednolikog protoka kroz granice zona. Budući da nema relativnog gibanja jedne zone u odnosu na drugu (mreža je statična), rezultat numeričkog proračuna je slika strujanja za jedan položaj rotora u odnosu na stator.

Posebnu pozornost treba posvetiti granicama između rotirajućih i statičnih zona, koje se zbog komunikacije koja se kroz njih odvija mogu nazivati sučeljima. Ako topologija proračunske mreže dvije zone na mjestu preklapanja nije identična, za interpolaciju se koristi tzv. generalizirano sučelje (eng. *generalized grid interface*, GGI) [5]. GGI se može koristiti i za povezivanje mreža koje nemaju isti tip elemenata (npr. heksaedarski i tetraedarski elementi) te u slučajevima kada između dvije površine postoji rupa ili sjecište.

Ako protok kroz sučelje nije jednolik, primjenjuje se osrednjavanje strujanja u ravnini miješanja (eng. *mixing plane*). Na sučelju između zona, u zadanom intervalu, dolazi do osrednjavanja varijabli strujanja te se osrednjene vrijednosti koriste kao rubni uvjeti za pojedinu zonu.

Tranzijentni pristup podrazumijeva korištenje pomične mreže, odnosno rotaciju rotora. U tom se slučaju rješavaju nestacionarne Navier-Stokesove jednačbe te se u potpunosti modelira interakcija između rotora i statora.

2.2 Odvojeni i spregnuti pristup rješavanju Navier-Stokesovih jednačbi

Od 80.-ih godina 20.-og stoljeća sustav Navier-Stokesovih jednačbi rješava se odvojenim pristupom, a najpopularniji su algoritmi SIMPLE [6] i PISO [7]. Jednačbe se rješavaju sekvencijalno: momentna jednačba rješava se s pogrešnim vrijednostima tlaka, a jednačba tlaka s pogrešnim vrijednostima brzine. Budući da vrlo male oscilacije gradijenta tlaka uzrokuju velike promjene u polju brzine, varijabla tlaka se mora značajno podrelaksirati kako bi algoritam bio stabilan.

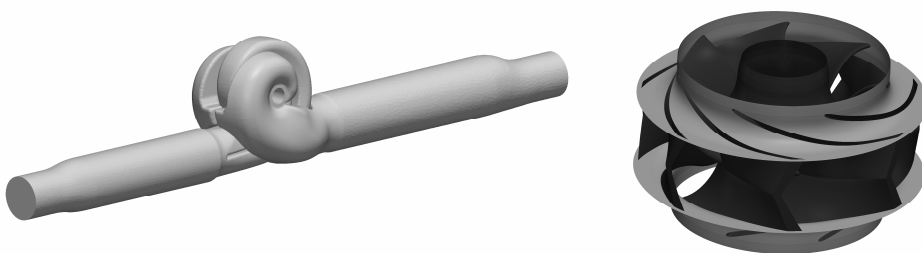
U spregnutom pristupu koji se razvija posljednjih nekoliko godina [8], jednačbe očuvanja momenta količine gibanja i jednačba kontinuiteta rješavaju se zajedno u istom koraku linearnog rješavača. Takav način rješavanja omogućuje značajno bržu i stabilniju konvergenciju polja tlaka, a ujedno i polja brzine, uz vrlo visoke podrelaksacijske faktore (približno jednake 1). U ovom radu dana je usporedba

konvergencije za problem strujanja u centrifugalnoj pumpi, odvojenog rješavača koji se temelji na SIMPLE algoritmu i spregnutog rješavača implementiranog u OpenFOAM-u.

3 REZULTATI I DISKUSIJA

3.1 Geometrija, proračunska mreža i rubni uvjeti

Na Slici 1 lijevo, prikazana je dvostrujna centrifugalna pumpa, vanjskog promjera rotora 310 mm, s kućištem i cjevovodima promjera 250 mm. Brzina vrtnje pumpe je 1300 o/min, a radna točka s najvećom iskoristivosti određena je volumenskim protokom $14,5 \text{ m}^3/\text{min}$. Budući da je karakteristika pumpe parabola, za konstrukciju je dovoljno izračunati tri radne točke. Drugoj radnoj točki odgovara protok $11,6 \text{ m}^3/\text{min}$, a trećoj $17,4 \text{ m}^3/\text{min}$.



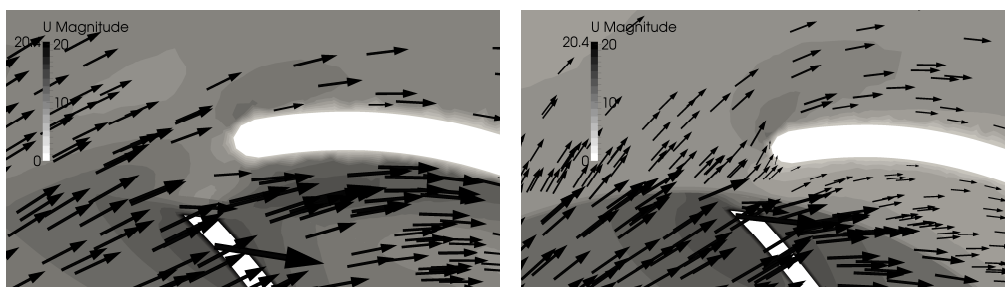
Sl. 1. Kućište pumpe (lijevo) i rotor (desno)

Na Slici 1 desno, prikazano je zatvoreno dijagonalno radijalno kolo s podrezanim lopaticama. Proračunska mreža pumpe je hibridna s ukupno 9 milijuna ćelija. MRF zona oko rotora je blok strukturirana s heksaedarskim ćelijama, a mreža difuzora, usisnog i tlačnog cjevovoda je nestrukturirana s tetraedarskim i prizmatičnim ćelijama.

Na ulazu u usisni cjevovod postavljena je konstantna vrijednost brzine koja odgovara pretpostavljenom masenom protoku te Neumannov rubni uvjet za tlak. Na izlazu iz tlačnog cjevovoda postavljen je Neumannov rubni uvjet za brzinu, te vrijednost statičkog tlaka jednaka 0, što znači da se proračunom mjeri manometarski tlak.

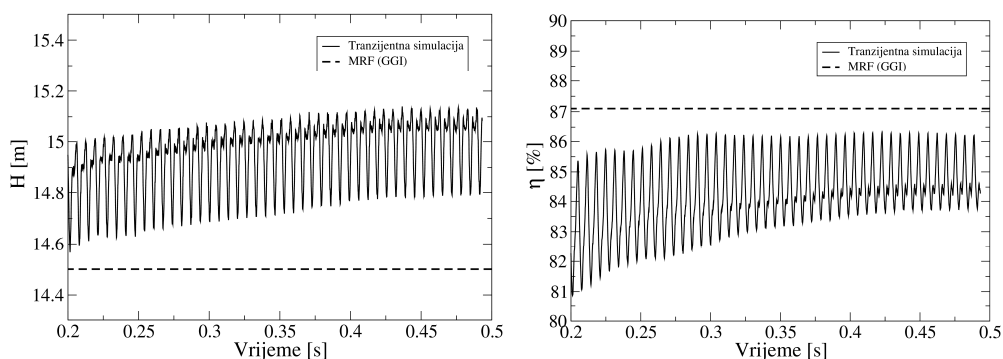
3.2 Usporedba različitih metoda za modeliranje interakcije rotora i statora

Na Slici 2 lijevo, prikazani su vektori brzine za numeričke proračune dobivene upotrebom metode MRF s GGI sučeljem između rotora i statora. Usporedbom s rezultatima dobivenima MRF metodom s osrednjavanjem polja na sučelju, može se primijetiti razlika u vektorima brzine.



Sl. 2. Vektori brzine na izlazu iz rotora za MRF s GGI sučeljem (lijevo) i osrednjavanjem (desno)

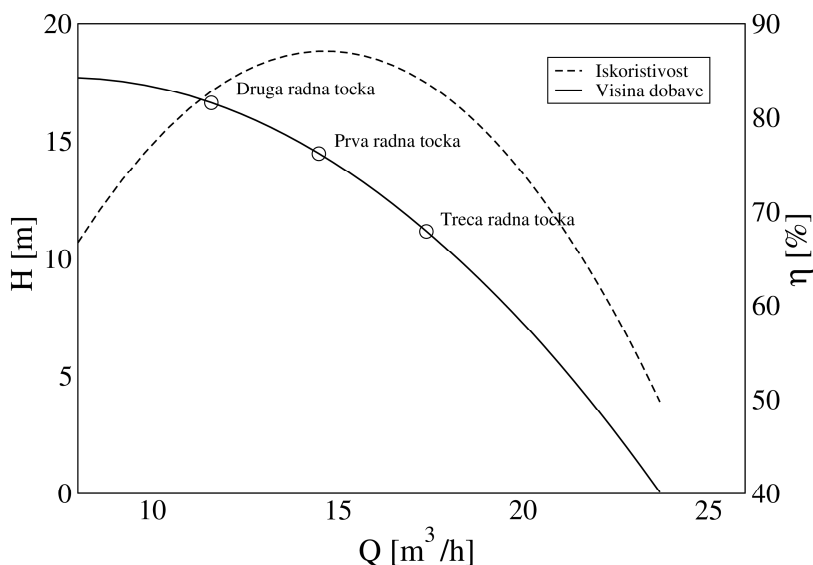
Osrednjavanjem na sučelju vektori mijenjaju smjer, a ne samo veličinu, Slika 2 desno, što u ovome slučaju daje nefizikalni rezultat. Na Slici 3 su prikazane oscilacije visine dobave i efikasnosti pumpe za simulaciju s pomičnom mrežom, osrednjeni u vremenu i odgovarajuće vrijednosti dobivene stacionarnom simulacijom. Relativna pogreška stacionarne simulacije za visinu dobave je -2,7%, a za iskoristivost pumpe 2,3%. Simulacija s pomičnom mrežom prikazuje puni krug rotacije rotora sa svim tranzijentnim pojavama u strujanju, ali je, zbog ograničenja vremenskog koraka Courantovim brojem, računalno vrlo zahtjevna. Stoga je razumno koristiti stacionarnu simulaciju s MRF metodom, koja daje dovoljno dobre rezultate, a troši manje računalnog vremena.



Sl. 3. Oscilacije visine dobave i iskoristivosti u tranzijentnoj simulaciji

3.3 Konstrukcija radne karakteristike pumpe

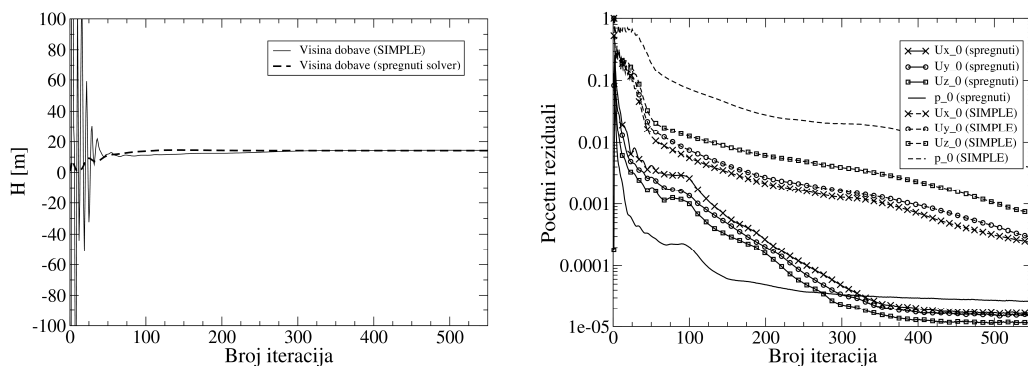
Stacionarnom simulacijom određene su visine dobave pumpe te je, uz zadane volumenske protoke, određena radna karakteristika pumpe te je prikazana dijagramom na Slici 4. U dijagram je ucrтана i krivulja iskoristivosti pumpe, također dobivena numeričkim proračunom.



Sl. 4. Radna karakteristika pumpe

3.4 Usporedba odvojenog i spregnutog rješavača

Na Slici 5 lijevo, prikazana je konvergencija visine dobave pumpe po iteracijama numeričkog rješavača. Uspoređen je rješavač na principu SIMPLE algoritma kojim se jednačbe rješavaju odvojeno i rješavač kojim se polja brzine i tlaka rješavaju spregnuto, u jednoj matrici. Kod odvojenog rješavača primjećuje se vrlo velika oscilacija visine dobave u početnim iteracijama. Budući da visina dobave ovisi o razlici tlakova, ovakva je nestabilnost očekivana s obzirom na paraboličnu karakteristiku jednačbe tlaka. Zbog stabilizacije se kod odvojenog rješavača treba koristiti vrlo niska podrelaksacija tlaka (0,3). Kod spregnutog rješavača nema podrelaksacije tlaka, a konvergencija visine dobave je monotona i stabilna.



Sl. 5. Konvergencija visine dobave (lijevo) i polja tlaka i brzine (desno) za odvojeni i spregnuti rješavač

Na slici 5 desno, prikazani su reziduali polja brzine i tlaka kroz iteracije: spregnuti rješavač konvergira u 430 iteracija, dok odvojenom treba oko 1300 iteracija.

4. ZAKLJUČAK

Za simulaciju strujanja u centrifugalnoj pumpi mogu se primijeniti stacionarne i tranzijentne metode. Stacionarne metode daju dobru aproksimaciju strujanja te se dobro poklapaju s vremenski osrednjenom slikom strujanja tranzijentne simulacije. Prednost je stacionarnih metoda što omogućuju značajno brži proračun u odnosu na tranzijentne metode kod kojih treba osigurati dovoljno malen Courantov broj za stabilnost i točnost izračuna. Za modeliranje interakcije između rotora i statora stacionarnom metodom koriste se višestruki referentni koordinatni sustavi te sučelja za interpolaciju veličina između rotora i statora. Za slučaj centrifugalne pumpe bolje rezultate daje generalizirano sučelje, dok osrednjavanje veličina na sučelju uzrokuje nefizikalne skokove u poljima. Primjena spregnutih rješavača kod kojih se Navier-Stokesove jednačbe rješavaju simultano, omogućavaju ubrzavanje konvergencije rješenja i stabilniju konvergenciju polja tlaka u odnosu na odvojeno rješavanje jednačbi.

Literatura:

- [1] Gülich, J.F., *Centrifugal Pumps*, Springer, 2014.
- [2] Jasak, H., Beaudoin, M., OpenFOAM turbo tools: From general purpose CFD to turbomachinery simulations, Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, 2011.
- [3] Jasak, H., OpenFOAM: Open source CFD in research and industry, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, 2013, pp. 89-94.
- [4] Menter, F.R., Zonal Two Equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows, Proceedings of 24th Fluid Dynamics Conference, 1993.
- [5] Beaudoin, M., Jasak, H., Development of a General Grid Interface for turbomachinery simulations with OpenFOAM, Proceedings of Open Source CFD International Conference, 2008.
- [6] Patankar, S.V., Spalding, D.B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, 1972, pp. 1787-1806.
- [7] Issa, R.I., Solution of the implicitly discretized fluid flow equations by operator-splitting, *Journal of Computational Physics*, Vol. 62, 1986, pp. 40-65.
- [8] Vukčević, V., Jareteg, K., Jasak, H., pUCoupledFoam – an open source coupled incompressible pressure-velocity solver based on foam-extend, 9th OpenFOAM Workshop, Zagreb, 2014.

Autori:

Tessa Uroić, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, HR-10000 Zagreb, tel. 01 6168 116, e-mail: tessa.uroic@fsb.hr

Marko Horvat, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, HR-10000 Zagreb, e-mail: mh187273@stud.fsb.hr

Hrvoje Jasak, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, HR-10000 Zagreb, tel. 01 6168 239, e-mail: hrvoje.jasak@fsb.hr